

一回励起のエコープラナー拡散強調画像を用いた脳白質神経路のカラー表示

| | |
|--------|---|
| 著者 | 田村 元 |
| 学位授与機関 | Tohoku University |
| URL | http://hdl.handle.net/10097/54862 |

①

博士論文

一回励起のエコープラナー拡散強調画像
を用いた、脳白質神経路のカラー表示

東北大学医学部放射線医学教室

田村 元

要約

目的：短時間で撮像可能な、一回励起のエコープラナー法による拡散強調画像 (EPDWI) を用いて、臨床的に使用可能な、脳白質線維の走行をカラー表示した画像を作成すること。

方法：正常ボランティアと MRI 検査を依頼された患者を対象にした。直交 3 方向に Motion Probing Gradient をかけて得られる 3 枚の EPDWI をもとに、その白黒を反転した画像を作り、それに赤青緑のカラースケールを与え合成し、脳白質線維の方向をカラー表示した画像を作成した。これと、スピンエコー法 T_2 強調画像 (SET_2WI) とを重ね合わせ、作成された画像と解剖学的記載との対比を行った。

Apparent Diffusion Coefficient (ADC) 計算画像を作成し、これにカラースケールを与えて得られる画像等とも比較した。

結果：EPDWI による画像には渦電流による画像の歪みが生じたが、手作業による修正により、1 ピクセル以下のずれに修正することが出来た。正常ボランティア、患者を問わず、主な白質線維が明瞭に描出された。EPDWI から作ったカラー画像と SET_2WI の合成画像は、コントラストも ADC 計算画像に近く、ノイズはそれより小さく、解剖学的構造を詳細に認識できた。

結論：EPDWI と SET_2WI を重ね合わせた、白質神経路カ

ラー表示画像は、臨床的に有用な画質を提供すると思われる。

Magnetic Resonance Imaging (MRI) は中枢神経領域の画像診断に不可欠のものとなっており、組織の弛豫時間の差に基づいた見地なコントラストにより、種々の病変学的病変が明確に検出されるからである。さらに、blood oxygen level-dependent (BOLD) 効果を利用して、脳血管障害 (cerebral ischemia) を検出する MRI も行われるようになってきている。また、 ^{31}P MR を、 phosphocreatine (PCr) と ATP (Adenosine Triphosphate) の濃度変化による、 phosphorylation も検出されている。これらは、いずれも弛豫時間の差をコントラストに利用したものである。

これとは全く異なるものとして、MRI では、対象の動き、変位の情報を得ることが可能である。これは Phase-Contrast 法による Magnetic Resonance Angiography (MRA) に利用されているが、さらに、同様の方法で、対象の変位の情報を得ることができる。

【1】拡散強調画像とは

拡散とは分子等の微粒子が熱運動等により位置を変化させていく過程のことである。その変位の大きさの測定は、拡散係数を用いて拡散を測定する時間をもとにしたとき、およそ以下の式が成り立つことが知られている。液体の水を測定する水分子の拡散係数は 37°C で $3.0 \times$

研究背景

近年、Magnetic Resonance Imaging (MRI)は中枢神経領域の画像診断に不可欠のものとなって来ている。組織の緩和時間の差に基づいた良好なコントラストにより、種々の解剖学的構造が明瞭に描出されるからである。さらに、blood oxygen level-dependent (BOLD)効果¹⁾を利用した脳機能検査(functional MRI)も行われるようになってきている。また、spin labeling²⁾や、gadolinium diethylenetriamine pentaacetic acid (Gd-DTPA)急速静注による、perfusion study^{3, 4)}も研究されている。これらは、いずれも緩和時間の差をコントラストに利用したものである。

これとは全く独立したものとして、MRIでは、対象の動き、変位の情報を得ることが可能である。これはPhase-Contrast法によるMagnetic Resonance Angiography (MRA)に利用されているが⁵⁾、さらに、同様の方法で、対象の拡散の情報を得ることができる。

【1】 拡散強調画像とは

拡散とは分子等の微粒子が熱運動等により位置を変化させていく過程のことである。その変位の大きさの目安は、拡散係数を D 、拡散を測定する時間を t としたとき、およそ $6Dt$ の平方根に等しいことが知られている⁶⁾。液体の水を構成する水分子の拡散係数は 37°C で $3.0 \times$

$10^{-3} \text{ mm}^2/\text{sec}$ であり、 $t = 50 \text{ msec}$ の時、 $\sqrt{6Dt} = 30 \mu\text{m}$ となり、その変位が細胞レベルの大きさであることが判る。

MRI 拡散強調画像 (Diffusion Weighted Image, DWI) は、信号をだしているスピンを有する分子 (水) のランダムな変位 (intravoxel incoherent motion, IVIM) を信号強度に反映させた画像である。通常、スピンエコー法の 180° パルスの前後に対称的に、強さと時間の全く等しい二つの強力な傾斜磁場 (motion-probing gradient, MPG) をかける方法を用いる^{7,8)}。これにより、静止しているスピンの位相はエコーを受信する時点で傾斜磁場をかける前の状態に戻るが (refocusing)、移動したスピンは位相が元に戻らないことになる (dephasing)。すると、拡散によりランダムに移動しているスピン集団からの信号は、位相が不揃いとなり、減弱する。MPG の間隔は通常の撮像シーケンスでは 50 msec 程度であり、DWI には細胞レベルの情報が含まれていることになる。

【2】DWI コントラストに含まれるもの

この場合、熱運動のみならず、ランダムなスピンの運動は全てが信号低下の原因となるので、毛細管網の血流などによる、よりマクロな運動も信号低下に寄与する。また、熱運動を妨げる細胞膜のような隔壁構造等が存在すると、信号減衰は、自由な拡散によるものより小さく

なり MPG の間隔に依存して変化する (restricted diffusion)。従って、この拡散強調画像から計算して求められる拡散係数は、みかけの拡散係数 (ADC, apparent diffusion coefficient) と呼ばれる。ただし、脳内の血液成分は、脳全体のせいぜい数%に過ぎないので、MPGの強度と時間が十分であれば、信号強度におよぼす灌流の影響は少ない⁶⁾ (灰白質では一割強の影響があるとの報告も見られる⁹⁾)。MPGの強度と時間は、 b 値⁸⁾で表され、 $b \gg 100 \text{ sec/mm}^2$ であればこの条件は満たされる⁶⁾。

また、DWIでは、180度パルスの前後にMPGをかけるため、エコー時間(TE)が長くなる。従って、強い T_2 コントラストを合わせ持つ。

【3】 DWI の信号強度の理論式¹⁰⁾

一様な媒質だが、拡散の異方性がある場合を考える。MRI撮像時、90度RFパルス照射後の時刻 t における横磁化の変化は次の式で表せる。

$$M(t) = M(0) \exp \left[- \left\{ i \mathbf{r} \cdot \mathbf{k}(t) + i \gamma B_0 t + t/T_2 + \int_0^t \mathbf{k}(t') \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{k}(t') dt' \right\} \right]$$

ここで、 i は虚数単位、 \mathbf{r} は位置ベクトル、 $\mathbf{k}(t) = \gamma \int_0^t \mathbf{G}(t') dt'$ は波数ベクトル、 γ は磁気回転比、 $\mathbf{G}(t)$ は傾斜磁場(MPG)の傾きを表すベクトル、 B_0 は静磁場強度、 T_2 は横緩和時間、 \mathbf{D} は拡散テンソルと呼ばれる三次元の

対称なテンソルである。 \mathbf{D} は拡散係数に相当するものであるが、拡散の異方性を表現している。このテンソルの成分は、MPGをかける方向に依存して変化するが、対角成分の和 $D_{11}+D_{22}+D_{33}$ 、すなわち trace は変化しない。指数関数内の第3項は、 T_2 減衰を表し、最後の項が MPG と拡散とにより信号が減衰していく成分である。MPGの効果は b 値で表現されるが、拡散の異方性がある場合には b も行列 (b -matrix) となる。この行列を、 $b_{ij} = \int_0^t k_i(t')k_j(t')dt'$ で定義すると、最後の項は書き直すことが出来て、

$$M(t) = M(0) \exp \left[- \left\{ i\mathbf{r} \cdot \mathbf{k}(t) + i\gamma B_0 t + t/T_2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{ij} D_{ij} \right\} \right]$$

となる。

MPGが、例えば、“1”軸方向を向いていたとすると、 b -matrixの成分の中で0でないのは、 b_{11} のみとなり、拡散による信号の減衰は、 $\exp[-b_{11}D_{11}]$ で表されることになる。従って、拡散強調画像の信号の減衰を測定すれば、 D_{11} を求めることができる。同様にして、“2”軸方向に MPG をかければ、 D_{22} を得ることができる。

【4】 DWI の臨床応用

1980年代の後半になって、Le Bihan らが、DWI の中枢神経系への適用を報告⁸⁾して以来、その臨床的有用性が検討されてきた。

DWI の臨床応用には、著明なモーションアーチファクトが問題で、“navigator” echo を用いて補正する方法などが工夫されていた¹¹⁻¹³⁾。

最近になり、エコープラナー法(Echo-planar Imaging, EPI)¹⁴⁾が臨床機でも使用可能となり、一回励起(single-shot) EPI を用いて、モーションアーチファクトの無い DWI (EPDWI) が短時間で撮像できるようになった。しかし、その場合、磁化率効果や渦電流等による画像の歪みが著明である。

DWI の有用な例として、超急性期梗塞巣の検出^{4, 12, 15-19)}、くも膜嚢胞と類上皮腫との鑑別²⁰⁾、そして、拡散の異方性を利用した脳白質線維の走行の描出²¹⁻²⁶⁾が知られている。

【5】 拡散の異方性

DWI により生体脳白質の拡散の異方性を検出できることは、Thomsen ら²¹⁾により示唆され、1990年に確立した²²⁻²⁶⁾。白質の線維に沿う方向の拡散は大きく、それに垂直な方向の拡散は小さいことが明らかとなった。

脳白質の拡散の異方性の成因はまだ確定していない²⁷⁾。

DWIから得られる脳白質の拡散異方性情報を用いて、白質神経路を画像表示しようとする試みが散見されるが²⁸⁻³⁶⁾、未だ十分な成果は得られていない。

拡散異方性は脳梗塞等の病巣の検出において、病巣の範囲などを同定する際の障害となる場合がある。その場合、直交3方向にMPGをかけた3枚のDWIから求まるADCを加算した、拡散テンソルのtrace ($D_{11}+D_{22}+D_{33}$)に相当する画像を作ることによって病巣の範囲が明瞭となることが知られている^{37, 38)}。

【6】 拡散異方性情報を含む画像読影上の問題点

我々の施設のDWIは、single-shot EPIを用いたもので(EPDWI)、1997年半ばより、直交3方向に $b=1000 \text{ sec/mm}^2$ のMPGをかけて撮ることが可能となった。主な臨床応用として、脳梗塞巣の検出や、脳腫瘍症例で腫瘍と深部白質との関係を見るために用いられている。そのとき得られる $b=0$ の画像を含めた4枚の画像を読影する時、頭の中でそれらを重ね合わせる必要がある。EPDWIは、詳細な解剖学的構造を見るには不十分な画質であり、その上4枚の画像を見比べて読影しなければならないので煩雑で手間がかかり、時として混乱を招く。

研究目的

EPDWI 読影上の問題点を解決するために、以下に述べる研究を行った。

中田等の方法^{32, 33)}を用いて、直交3方向にそれぞれMPGをかけて得られる3枚のDWIを白黒反転し、それぞれに、赤、緑、青のカラースケールを与えて合成することにより、異方性を含めた拡散の情報をカラー表示することが可能と思われる。これにより、1枚の画像に情報が集約され、直感的に理解しやすくなることが期待される。しかし、single-shot EPIを用いることによる画像の粗さや、以下に述べる T_2 の影響があり、これが十分なものとは言い難い。

DWIはTEが100 ms以上あるので、信号強度は、ADCだけでなく、 T_2 にも強く依存している(6ページのDWIの信号強度の理論式を参照)。この影響は無視できず、これをなくすため、 $b=0$ の画像と $b=1000$ の画像とからADC計算画像を作成し、それにカラースケールを与えて拡散成分のみを抽出したカラー表示画像も検討に値すると思われる。この場合には、画像から直接ADCの値を評価できる。すなわち、白質神経路とADCとが同時にマッピングされることになる。しかし、計算時に生ずる有効桁数の減少のためノイズの増えた画像になると思われる。

中田等の方法によるDWIを反転させて用いた白質線

維路のカラー表示は、 T_2 強調画像(T_2WI)の白黒を反転した成分を持つ。そこで筆者は、新たに次のような方法を考案した。すなわち、そのカラー表示画像と通常のスピンエコー法あるいは高速スピンエコー法の T_2WI (SE T_2WI)を重ね合わせるというものである。この方法により、 T_2 成分がある程度打ち消しあって拡散情報が抽出され、しかも、解剖学的構造が明瞭なS/Nの良い画像を得ることが出来るものと期待される。

また、これまでの所、臨床例において白質線維路のカラー表示をまとめた報告は見られない。

そこで、single shot EPIによるDWIを用いた白質線維路のカラー表示画像、それをSE T_2WI に重ね合わせた画像等の作成を試みた。それらによって、これまで知られている白質線維の走行がどの程度描出されるか、正常例と臨床例での検討を行った。

研究方法

【1】対象

対象は脳腫瘍や脳梗塞などを疑われて MRI 検査を依頼された患者で、拡散強調画像を含めて撮像した 61 名(男 33 名、女 28 名、0-81 歳、平均 44 歳、この内脳腫瘍あるいはその疑い例が 39 名)と、正常ボランティア 3 名の計 64 名である。正常ボランティアからは口頭でインフォームドコンセントを得た。

【2】DWI の撮像

使用機種は Siemens 社製の Magnetom Vision 1.5T で、ヘッドコイルを使用した。撮像シーケンスは、同社製のスピンエコータイプの single-shot EPDWI (TR/TE = 4700 / 118 ms, bandwidth = 833 Hz/pixel) を用い、image matrix = 96×128 、撮像領域 (FOV) = 220 mm、スライス枚数 10、スライス厚 5 mm、スライス間隔 3 mm の条件で撮像した。1 スライスあたり、スライス内の直交 2 方向、スライスに垂直な方向の、3 方向に MPG ($b_{11} = b_{22} = b_{33} = 1000 \text{ sec/mm}^2$) を印加したものと、MPG を印加しない ($b=0$) ものの、4 枚の画像を撮像した。既に研究背景で述べたように、この b 値では灌流の影響は無視出来ると考えられる。スライス方向は、横断像では眼窩耳孔線に平行、冠状断像では橋から延髄にかけての正中背面のラインにほぼ平行とした。TR=4.7 秒の間に 10 枚

のスライスを撮像し、それを preparation(一定の縦磁化を準備するために一度シーケンスを走らせるもの), $b=0$, b_{11} , b_{22} , b_{33} の 5 回行い、2 回の加算をして、撮像時間は $10TR=47$ 秒であった。

【3】画像処理

得られた画像に以下の処理を行った。

処理 1: DWI を反転させて用いる白質線維路のカラー表示

まず、DWI を 8-bit の画像としてパーソナルコンピュータに取り込んだ。直交 3 方向に MPG を印加して得られた 3 枚の DWI には渦電流による画像の歪みが存在する。この歪みは、位相方向の偏位と拡大・縮小から成っている。以下に述べる画像処理ソフトウェアを用い、手作業で $b=0$ の画像の輪郭と可能な限り一致させることにより歪みを修正した。1 ピクセルでもずれた場合には、その程度のスケールの神経路の拡散異方性情報は、画像を重ねる際に失われることを配慮した。しかる後、画像の白黒を反転させた。そうして得られた画像の明暗に応じて、上下方向に MPG を印加した画像には赤、前後方向のものには青、左右方向には緑のカラースケールを与え、それを合成して一枚のカラー画像とした。これにより、上下方向に走る線維は赤く、前後方向の線維は青、左右方向は緑に見えることになる。これらの操作は、

Apple 社製 Macintosh 上の Adobe Photoshop 4.0J を用いて行った。

処理 2: ADC を計算して求める白質線維路のカラー表示画像

$b=0$ の画像の、あるピクセルの信号強度を S_0 、 $b_{11}=1000$ sec/mm² の画像の同じピクセルの信号強度を S_{1000} としたとき、 $D_{11}=\log_e(S_0/S_{1000})/1000$ の値を計算し、0 から 3×10^{-3} mm²/sec の範囲で白黒 8-bit の画像として表示した。同様にして、 D_{22} 、 D_{33} の計算画像を求めた。それらに上記と同様のカラースケールを与えて一枚のカラー画像として表示した。

処理 3: trace 画像

上で得られた D_{11} 、 D_{22} 、 D_{33} の計算画像を加え合わせて平均を取り、白黒のコントラストの trace 画像とした。これは拡散テンソルの trace を意味しており、直交 3 方向の MPG を回転させても一定の値をとることが期待される量である。

処理 4: trace で標準化したカラー表示画像

カラー表示画像上に明暗があると、同じ色相でも色彩が違って見える。これをなくすため、処理 2 で作られた画像を trace で割って、均一な明度の画像を得た。

処理 5: T_2 強調画像との重ね合わせ

これが本論文の主たる目的に該当する方法であるが、通常のスピンエコー法、または高速スピンエコー法の

T₂WIに、処理1で作った画像を重ね合わせた。重ね合わせの際、T₂WIが有する解剖学的情報が失われないように、軽度のT₂強調成分が残る程度に二つの画像の重み付けを調整した。

ADC 計算画像の作成や処理には、the U.S. National Institutes of Health で開発された public domain NIH Image V1.61b17 のソースコードの User.p を変更したプログラムを用いた。処理5には、上記の Photoshop 4.0Jを用いた。

上のようにして得られた画像の色相と、これまでに明らかにされている主な白質線維構造の解剖学的記載⁴⁰⁻⁴⁴⁾との対比を、正常例と、臨床例で行った。

研究結果

single-shot EPDWI では、カラー表示のために画像を重ね合わせる際に、画像の歪みが問題となったが、歪みはすべて位相方向の変位によるものであったため、目で見ながらの手作業ではあるものの補正が可能であった。その結果、位相(前後)方向の画像の辺縁部で、1 ピクセル以下の変位に抑えることが出来た。従って、中心部では変位はほとんど無視できると考えられた。左右方向の変位は存在しなかった。

処理 1、2、4、5 で作られた、いずれのカラー表示画像においても、従来、compact white matter pathways⁴⁴⁾として スピンエコー T_2 WI で低信号に認められていた、白質線維路の走行の、色相による確認が可能であった。また、従来の MRI では同定できなかった壁板や、描出が不明瞭であった上縦束や下小脳脚が、明瞭に描出された。しかしながら、研究目的で予想したとおり、次に述べるような差が認められた(図 1)。

処理 1 で得られた画像(図 1, a)は、白質線維の走行を読みとることが出来たが、詳細な解剖学的構造を十分捕らえられなかった。また、 T_2 コントラストを反転した成分を含んでいるため、処理 2 の画像と比べかなり色彩が違っていた。処理 2 の画像(図 1, b, c)は、理論的には正しいコントラストを持つものであるが、ノイズが多く解剖学的詳細を見ることが困難であった。処理 4(図 1, d)

では、彩度の上昇が見られたが、解剖学的構造との対応をつけることが困難であった。処理 5 で作られた SET₂WI と重ね合わせた画像(図 1, f-i)は、期待に違わず、ノイズが少なくコントラストは処理 2 で得られたものに近い画像であり、また、解剖学的構造との対応をつけることが容易であった。

正常脳白質神経路の観察

【1】連合線維 (association fibers)

上後頭前頭束(superior occipitofrontal fasciculus): 前頭葉と頭頂葉や後頭葉を連絡する線維束で、尾状核の上外側、脳梁下方、放線冠の内方を前後に走る。本線維束は前方ほど線維密度が高い。このため T₂WI 横断像で側脳室体部の前方部の側壁に平行に明瞭な線状低信号として、冠状断では斑状低信号として認められる。

カラー表示画像では同部が青色で表示され、前後に走る線維であることが確認された(図 1, a-d, f, 図 2, a)。

上縦束(superior longitudinal fasciculus): 前頭葉から頭頂葉、後頭葉、側頭葉を連絡する大きな線維束で、島の上部を走行し、側頭葉に向かう線維は下方に弓状に曲がるため弓状束(arcuate fasciculus)とも言われるが、T₂WIでは軽度の低信号であり、明瞭には認められない。

カラー表示画像では、島の上部に上下に扁平な形の青色の構造として明瞭に認められた(図 1, a-d, f, 図 2, b)。

また、側頭葉に向かって下行する部分は赤色の線維として認められた(図 3,b)。

帯状束(cingulum): 大脳半球内側面で帯状回や海馬傍回の白質内を脳梁の曲面に沿う形で走る線維束で、 T_2WI 冠状断で脳梁の上方の帯状回内に同定できる。横断像では同定困難な場合がある。

カラー表示画像では、冠状断、矢状断、横断像とも容易に同定可能であった(図 1, a-d, f, 図 2)。

鉤状束(uncinate fasciculus): 腹側成分と背側成分に分けられ、腹側成分は前頭葉眼窩回と側頭葉吻側内側部を連絡し、背側成分は中前頭回付近と側頭葉吻側外側部を連絡し、下後頭前頭束と合流する。島の前下縁を通して鉤状に曲がる。 T_2WI では前頭葉眼窩面から外包、前障、最外包の下部にかけての低信号を認めるが、側頭葉の吻側の線維は判然としない。

カラー表示画像では、側頭葉吻側部で下行する線維が赤色に認められた(図 1, h, 図 2, a)。

下後頭前頭束(inferior occipitofrontal fasciculus)と下縦束(inferior longitudinal fasciculus): 下後頭前頭束は、外包、最外包の下部を通り、前頭葉下外側部と側頭後頭葉下外側部を連絡する。下縦束は、後頭葉と側頭葉を連絡する線維束で、側脳室下角・後角外側部を通り、視放線の外側で視放線とともに外側矢状層の形成にあずかると言われる。下後頭前頭束と下縦束とは明瞭には

分離できない⁴⁵⁾。人間の下縦束の存在を疑問視する説もある⁴²⁾。

カラー表示画像では、外包、最外包の下部や外側矢状層は明瞭な青色構造として認められたが、蝶形骨洞と側頭骨の空気による磁場の不均一性のため、前頭葉内側と側頭葉外側の底部の構造は描出が不良であった(図 1, i、図 2)。

【2】交連線維(commissural fibers)

脳梁(corpus callosum): 脳梁は T_2 WI 矢状断像で明瞭に認められるが、通常の横断像では体部は明瞭ではない。膝部や小鉗子、膨大部と大鉗子は、横断像で明瞭に認められる。体部～膨大部からの線維の一部は下行して、側脳室下角や後角の外側で壁板(tapetum)を形成するが、MRIで壁板を同定することは困難であった。

カラー表示画像では、横断像においても、脳梁体部が緑色の構造として明瞭に認められた。また、側脳室後角から三角部の外側壁は壁板に対応する上下に走る線維構造として赤色に描出された(図 1, a-d, f、図 3)。

前交連(Anterior commissure): 前交連は、左右対称に淡蒼球外節と被殻の下を外後方に向かう T_2 WI で明瞭な低信号として認識できる。

カラー表示画像では、同部に左右に走る緑色の構造がみられるが、境界は不明瞭であった。

【3】 投射線維 (Projection fibers)

内包と錐体路系：放線冠から内包後脚にかけて赤色の構造が明瞭に認められた。内包前脚は前後に走る線維が多いと思われ、青色であった(図 3)。横断像では、大脳脚付近はスライス方向に対し斜めに走行するため、色相が不明瞭(低彩度)であった。橋縦束、錐体の皮質脊髓路も赤色に認められた(図 1, h, i、図 2、図 3)。

脳弓(fornix)：脳弓体は青色の構造として認められた。脳弓脚は斜めに走行するため色相は不明瞭であった。脳弓柱は境界不明瞭ながら赤色に認められた。時として、海馬采が青色に認められた(図 2、図 3)。

体性感覚系：前側索系，内側毛帯系，三叉神経系があるが，中心被蓋路や内側縦束等と共に被蓋全体が赤色に描出され、個々の線維束の色相による同定は困難であった(図 1, g, h)。

視覚系

視放線：側脳室三角部～後角外側には，脳室側から壁板，内側矢状層(internal sagittal stratum)，外側矢状層(external sagittal stratum)が配列し，さらに外側には他の連合線維からなる深部白質が位置すると言われている。視放線は外側矢状層の主要構成要素である。

Kitajima ら⁴⁶⁾によると，側脳室三角部～後角外側の T₂WI で低信号に認められる構造は壁板と内側矢状層で，その外側に見られる高信号の構造が外側矢状層または

視放線であるという。

これを我々のカラー画像の色相で確認しようとした。全ての例で明瞭に見られるわけではなかったが、 T_2WI で側脳室外側に明瞭な低信号と高信号の認められた症例では、 T_2WI と重ねたカラー表示画像で、青色の構造が、その低信号と高信号にまたがって認められ、Kitajimaら⁴⁶⁾の結果と一致した。ちなみに、その外側の連合線維は赤色に描出され、上縦束から連続する上下に走行している線維であることが明らかとなった(図3)。

視索：蝶形骨洞に近く、また斜めに走行するため明瞭な色相は得られなかった。

小脳系

上小脳脚：第四脳室上部の左右に赤色構造として認められた。頭側部の中脳正中部では、上小脳脚交叉が緑色～水色の構造として認められた(図1, h, i)。

中小脳脚：橋の左右から小脳半球内側部にかけて斜め後方に走行する青色の構造として認められた。横橋線維は緑色に認められた(図1, g, h)。

下小脳脚：左右対称性に、延髄の背外側から第四脳室下部の外側に連なる赤色の構造として認められた(図1, g, 図2, c)。

脳腫瘍症例における白質神経路の同定 (図4)

腫瘍の外科治療の際、腫瘍と深部白質、特に皮質脊髄

路との位置関係が問題となる。今回の方法で内包後脚が全ての症例で描出された。特に、処理5のT₂WIとカラー画像との重ね合わせにより、腫瘍の範囲の同定が容易となり、腫瘍と深部白質の神経路、特に内包後脚との位置関係が明瞭となった。図4にそのうちの数例を示す。

なお、腫瘍組織の拡散性状については、画像からは一定の傾向は読みとれなかったが、髄膜腫の1症例で放射状の腫瘍内拡散異方性が認められた(図4, g)。

内包後脚の外側にのみ腫瘍が接して認められる症例が2例あった(図4, a, d)。そのうち1例で軽度の麻痺が認められた。麻痺の認められる症例では、腫瘍に接する内包後脚外側縁の形が不整に見えた(図4, a)。

腫瘍や浮腫の進展する中に、あるいは腫瘍により圧排された形の上後頭前頭束、放線冠、上縦束、下後頭前頭束などが明瞭に認められる例があった(図4, e, f)。

考 察

【1】従来の方法論との比較

拡散の異方性を利用した脳白質の神経路の描出法については、いくつかの報告があるが、いずれも不十分なものであった。

まず、DWI そのものを見て、MPG と同一方向に走行する線維は低信号に、垂直のものは高信号に見えることから、線維を認識することが出来る²⁸⁾。この方法は、後処理を要さないことは利点であるが、白質線維の方向を同定するために何枚かの画像を頭の中で合成する必要がある、しばしば、対応する位置を決めることに苦勞する。しかもスライス方向の違いも考えに入れなければならない、分かり易いものではない。

紀ノ定ら²⁹⁾は、MPG と垂直のため高信号に描出される線維を、最大値投影(maximum intensity projection)法を利用して抽出し、神経路を一枚の画像に投影し、立体的な神経路の画像(MR Tractography)を作成した。しかし、この方法は、一方向のみに MPG を印加したもので、白質線維の走行の把握には不十分なものである。

Douek ら³⁰⁾は、anisotropic diffusion ratio (ADR) を $ADR_{13}=D_{11}/D_{33}$ のように定義した。そして、 ADR_{13} の値が1より大きい小さいかで線維の走行を表現出来るとし、その値に応じた色相を付加して、色により線維の走行が分かるように工夫した。しかし、これは二次元の

平面上での走行を示す事が出来るのみである。

Coremans³¹⁾らは、さらに、斜め方向の MPG を追加して、平面上の線維の走行の角度まで算出してカラーコード化を行った。これもやはり平面上の走行のみが描出されるやり方である。

中田ら^{32, 33)}は、直交 3 方向にそれぞれ MPG をかけて得られる 3 枚の DWI を白黒反転し、それぞれ、赤、緑、青 すなわち、RGB のカラースケールを与えて合成することにより、白質線維路の走行をカラー表示した。この方法は、一応三次元的な走行を表すことが出来る。ただし、斜めに走行している線維は描出できない。また、DWI の T_2 強調成分のため色彩が拡散異方性に対応しない。中田等は、これを知りながら、あえて ADC 計算画像を使用しなかった。それは、計算画像にすると画像のノイズが増加するからである。彼らは、スピンエコー法で拡散強調画像を得ており、解剖学的な情報も良く描出されている。しかし、スピンエコー法では検査時間が長く、また動きのアーチファクトのために臨床応用には不適當である。松沢ら³⁴⁾は、正常ボランティアで、EPI を用いた DWI からこの手法による画像を作成し本研究と同様の結果を得ているが、スピンエコー法による画像に比べ見劣りがする。

我々の施設の DWI は、直交 3 方向に MPG をかけて撮るものであり、カラー表示の手法を、中田らになら

う事が可能であった(処理 1)。我々の処理 2 の ADC 計算画像を用いたカラー画像は、確かに、処理 1 の DWI を反転させて用いるカラー画像に比べノイズの多い画像であった。しかし、ノイズの少ない処理 1 の画像を SET_2WI に重ね合わせることで DWI の T_2 コントラストを補正するというアイデアで、ノイズが少なくコントラストは ADC 計算画像を用いたカラー表示に近い画像を得ることが出来た。しかも、 SET_2WI を利用したことにより、解剖学的構造の把握が容易になった。

また、体軸に対して上下方向、左右方向、前後方向で色分けしたことにより、横断、冠状断、矢状断のいずれの画像でも、一つの線維束はほぼ同一の色相で表示され、異なるスライス方向の画像を比較することが容易であった。

Pierpaoli³⁵⁾らは、multishot EPI を用いて、人間の脳の 6 方向に MPG をかけて得られた 6 枚の DWI から拡散テンソルを求めて回転楕円体の集合として表示した。これは、拡散の異方性を見るには理想的な方法で、multishot EPI のため画像の歪みが少ないが、撮像時間が 25 分ほどかかる。また、シークエンスは限られた僅かな施設でのみ使用可能である。Makris ら³⁶⁾は、同様の方法で、拡散テンソルを求め、その主軸に対し本論文と類似のカラーコード化を行った。その結果を見ると非常にノイズの多い画像となっている。

我々の方法での撮像時間は 47 秒であり、急を要する検査でも十分対応できると思われる。なおかつ、S/N の良い画像が得られる。

【2】 白質線維の描出

このようにして single shot EPDWI を利用して、主な白質線維を明瞭にカラー表示することが可能であった。

拡散の異方性という新たなコントラストの付加により、MR 画像の上ではこれまで確認する事の出来なかった線維束が描出された。MRI 上で壁板を同定したのは、本研究が初めてと思われる。また、視放線の外側の深部白質が上縦束から連続する線維束に当たることを明確に指摘したのも、本報告が初めてと思われる。さらに、これまで緩和時間によるコントラストが不良で画像上判然としなかった上縦束、下小脳脚が初めて明瞭に描出されたことは、この方法の価値を示している。

これまでも、ある程度は認識可能であった線維束も、極めて明瞭に描出された。特に臨床的に非常に重要な錐体路系、特に内包後脚がすべての症例で描出されたことも注目される。

内包後脚は、淡蒼球と視床の間にあり、これらの構造の緩和時間との差が少ないため、緩和時間のコントラストからは同定しにくい。髄鞘化が生じて淡蒼球の鉄沈着がまだ起こっていないような小児期には内包後脚が T_1 、

T_2 短縮域として認識できる。成人では内包後脚の後半部に T_1 WI 低、 T_2 WI 高信号の構造が認められることから、これを目安に内包後脚の位置を推定することが出来る。同部は皮質脊髓路と考えられている⁴⁷⁾。また、内包後脚は浮腫に抵抗性で、付近に浮腫が及ぶと、 T_2 WI で高信号の浮腫は内包後脚の内側と外側に広がりさらにそれらを繋ぐような櫛の歯状の構造として認められる⁴⁸⁾。浮腫の存在する症例では、この形態から内包後脚の位置を同定できる。しかし、腫瘍などの病変が内包後脚付近に存在している場合、圧迫され変形した内包後脚の同定は、必ずしも容易ではない。EPDWIを用いたカラー表示画像では、内包後脚の位置はすべての症例で明瞭であったことから、それは病巣と内包後脚との位置関係を見るのに有用と思われた。また、正常例で認められる内包後脚後半部の T_1 、 T_2 の延長した構造が上下に走る線維束であること、浮腫のある症例では浮腫に囲まれた低信号の構造が上下方向に走る線維束であることが確認された(図 4, e)。

この他に、これまでの MRI に比べ明瞭になったと思われる線維束には、帯状束、鉤状束、脳梁、視放線、上小脳脚、横橋線維等がある。

上後頭前頭束、内包前脚、脳弓等は、これまでも、緩和時間によるコントラストのみでかなり良く識別されていたが、今回あらためて線維の走行が確認された。

橋被蓋の線維路は微細で構造も複雑であり、ほぼ同一方向の線維束からなるためコントラストが付かず、個々の構造を分離できないものと思われる。むしろプロトン密度強調像の方が内側毛帯などを明瞭に識別可能である。しかし、線維の拡散異方性の異常の描出が出来ることは、DWIの利点と思われる。

次にも述べるように、磁化率の差が原因のアーチファクトのため、前頭葉下部と側頭葉の尾外側部の神経路の描出は不良であり、single shot EPIの欠点と思われる。

【3】 本法の限界ないし弱点とその対策

本検査では、撮像領域は一辺が220mmの正方形で、matrixは読み取り傾斜磁場方向が128、位相方向が96である。このことより、一ピクセルの大きさは、読み取り方向は1.7 mm、位相方向は2.3 mmとなる。これが空間分解能の目安となる。single-shot EPIを用いる限りは、傾斜磁場強度の制限のため、これ以上の分解能の向上は現在のところ不可能と思われる。

Kitajima ら⁴⁶⁾によると、視放線の外側矢状層の厚さは平均1.1 mmであり、側脳室から外側矢状層までの距離は平均3.2 mmである。従って、外側矢状層の厚さは我々の分解能以下である。それにもかかわらず、 T_2 WIとの重ね合わせにより、ある程度外側矢状層が認識できたのは、それが分解能の最も良い読み取り方向に薄く、

位相方向に長く、隣接する線維は走行が直交するためコントラストが明瞭で、さらに全体に単純な層状構造を有しているためと思われる。

上後頭前頭束などの左右に細く前後に走行する線維束も、周囲との色相のコントラストが強い場合には比較的明瞭に認められた。

前交連は分解能の悪い前後(位相)方向に細く、左右方向に走行しているため描出不良となると思われる。

厳密に言えば、被験者の頭部体軸と主磁場の方向との角度の違い、さらに横断像と冠状断像ではスライス方向の違いにより、描出される線維の色相が異なってくるはずであるが、わずかな違いは臨床的に問題にならないと考えた。冠状面内を斜めに走行する線維は黄色に、矢状面内を斜走する線維は紫色に、水平面内を斜走する線維は水色に描出されるが、スライス方向に対してもスライスと垂直方向に対しても斜めに走行する線維は色相がなくなる。このため横断像の脳脚付近などの色相は不明瞭になる。これを補うには、スライスをさらに45度ほど傾けて再度撮像することが望ましいと思われる。我々の方法では、冠状断は横断像に対して60度ほどの傾きを有しており、横断像と冠状断像とをあわせて見ることにより、より多くの線維が認識できると考えられる。実際、横断像で脳脚付近の錐体路が判然としない場合、冠状断像でそれが認められる場合が多かった。

色相に関しては、コンピューター上の RGB カラーが、写真の印刷時に CMYK カラーに変換されるため、印刷された写真の色相と、コンピューターディスプレイで見る色相に違いがあった。写真の色相は、コンピューターディスプレイで見るものより彩度が低い印象であった。

single-shot EPI を用いているため、モーションアーチファクトは認められなかったが、磁化率効果による画像の歪みは強く、特に前頭洞、蝶形骨洞、中耳腔周囲の、前頭葉下部と側頭葉の尾外側部で著明であった。同部の神経路の描出は多くの場合出来なかった。また、渦電流による画像の歪みはカラー表示画像を作成する際の重ね合わせを手間のかかるものとした。手作業で歪みを補正した後重ね合わせなければならず、1 スライスの 4 種のカラー画像を作るために 10 分間程を要した。さらにまた、スピンエコー法の T_2WI に重ね合わせる際も磁化率効果による画像の歪みが問題となった。磁化率アーチファクトは single shot EPI を用いている限り不可避と思われ、カラー表示画像を日常の検査に適用するためには、自動的に歪みを補正し、画像を重ね合わせることの出来るソフトウェアの開発が必要である。

【4】将来の臨床的応用の展望

画像診断をする上で解剖学の占める役割は大きく、病巣の位置や形態を捉えることが重要である。本法を用い

ることにより、神経放射線分野の画像診断に熟達した専門医でなくとも、MR画像の上で脳白質の解剖学的構造を比較的容易に把握することが可能と思われる。今後、臨床の場で、本研究で行ったカラー表示が簡単に出来るようになれば、日常臨床の画像診断で本法が役立つものと期待される。特に、臨床症状に対応する責任病巣の把握や、腫瘍と深部白質の位置関係の読影精度の向上が期待できる。

また、虚血、梗塞、出血、外傷、脳炎、多発性硬化症、白質ジストロフィー、変性疾患等々、脳白質を侵す病態が多数存在するが、そのような疾患において、拡散係数や拡散の異方性の情報を得ることは、病態の把握に新しい視点をもたらすものと考えられる。さらに、小児の脳の発達や先天性脳奇形の評価にも応用できるものと思われる。

結 論

直交 3 方向に MPG をかけた single shot EPDWI を用いて、主な白質線維路のカラー表示が可能であった。特に、SET₂WI と重ね合わせることで、ADC 計算画像の色相に近く、かつノイズの少ない画像を作ることが出来、解剖学的構造を詳細に見ることが可能であった。これまでの MRI のコントラストでは不鮮明であった、上縦束、壁板、下小脳脚が MRI 上初めて明瞭に描出された。特に、内包後脚の位置をすべての症例で確認できたことは、臨床的有用性を示唆する。

日常検査に適用するために、自動的に画像の歪みを補正して重ね合わせをするソフトウェアの開発が望まれる。

謝 辞

本研究に際し、終始ご指導ご鞭撻を賜りました東北大学医学部放射線医学教室教授山田 章吾先生並びに同助教授高橋 昭喜先生に謹んで感謝申し上げます。

また、常に惜しめない援助をして下さいました栗原紀子先生、島貫 義久先生、古田 進先生、Laxmi N. Singh 先生、梅津 篤司先生をはじめとする同教室の皆様に深く御礼申し上げます。

さらに、実際に検査の労をとって下さいました梁川功氏、永坂 竜男氏、佐藤 弘之氏をはじめとする東北大学医学部附属病院診療放射線技師の皆様に厚く感謝いたします。

また、画像処理を手伝って下さいました、菅田 泰子氏に厚く御礼申し上げます。

最後に、本研究をまとめる際に便宜を図って下さいました秋田県立脳血管研究センターのスタッフの皆様に心から感謝申し上げます。

文献

- 1) Ogawa, S., Lee, T.M., Tank, A.R., et al. (1990) Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation. *Proc Natl Acad Sci U S A*, **87**, 9868-9872.
- 2) Detre, J.A., Leigh, J.S., Williams, D.S., et al. (1992) Perfusion Imaging. *Magn Reson Med*, **23**, 37-45.
- 3) Edelman, R.R., Mattle, H.P., Atkinson, D.J., et al. (1990) Cerebral Blood Flow: Assessment with Dynamic Contrast-enhanced T2*-weighted MR Imaging at 1.5 T. *Radiology*, **176**, 211-220.
- 4) Sorensen, A.G., Buonanno, F.S., Gonzalez, R.G., et al. (1996) Hyperacute Stroke: Evaluation with Combined Multisection Diffusion-weighted and Hemodynamically Weighted Echo-planar MR Imaging. *Radiology*, **199**, 391-401.
- 5) Crooks, L.E., Haacke, E.M. (1993) Historical overview of MR angiography. In: *Magnetic Resonance Angiography*, (Potchen, E.J., Haacke, E.M., Siebert, J.E. et al. eds.) Mosby, St. Louis, pp3-8.

- 6) Le Bihan, D., Breton, E., Lallemand, D., et al. (1988) Separation of Diffusion and Perfusion in Intravoxel Incoherent motion MR Imaging. *Radiology*, **168**, 497-505.
- 7) Stejskal, E.O., Tanner, J.E. (1965) Spin diffusion measurements: spin echoes in the presence of a time-dependent field gradient. *J Chem Phys*, **42**, 288-292.
- 8) Le Bihan, D., Breton, E., Lallemand, D., et al. (1986) MR Imaging of Intravoxel Incoherent Motions: Application to Diffusion and Perfusion in Neurologic Disorders. *Radiology*, **161**, 401-407.
- 9) Turner, R., Le Bihan, D., Maier, J., et al. (1990) Echo-Planar Imaging of Intravoxel Incoherent Motion. *Radiology*, **177**, 407-414.
- 10) Le Bihan, D. and Basser, P.J. (1995) Molecular Diffusion and Nuclear Magnetic Resonance. In: *Diffusion and Perfusion Magnetic Resonance Imaging*, (Le Bihan ed.), Raven Press, New York, pp5-17.
- 11) Ordidge, R.J., Helpern, J.A., Qing, Z.X. (1994) Correction of Motional Artifacts in Diffusion-weighted MR Images Using Navigator Echoes. *Magn Reson Imaging*, **12**, 455-460.

- 12) Marks, M.P., de Crespigny, A., Lentz, D., et al. (1996) Acute and Chronic Stroke: Navigated Spin-Echo Diffusion-weighted MR Imaging. *Radiology*, **199**, 403-408.
- 13) Yongbi, M.N., Ding, S., Dunn, J.F. (1996) A Modified Sub-Second Fast-STEAM Sequence Incorporating Bipolar Gradients for *in Vivo* Diffusion Imaging. *Magn Reson Med*, **35**, 911-916.
- 14) Edelman, R.R., Wielopolski, P., Schmitt, F. (1994) Echo-planar MR Imaging. *Radiology*, **192**, 600-612.
- 15) Moseley, M.E., Cohen, Y., Mintorovitch, J., et al. (1990) Early detection of regional cerebral ischemia in cats: comparison of diffusion- and T2-weighted MRI and spectroscopy. *Magn Reson Med*, **14**, 330-46.
- 16) Moseley, M.E., Kucharczyk, J., Mintorovitch, J., et al. (1990) Diffusion-Weighted MR Imaging of Acute Stroke: Correlation with T2-Weighted and Magnetic Susceptibility-Enhanced MR Imaging in Cats. *AJNR*, **11**, 423-429.
- 17) Mintorovitch, J., Moseley, M.E., Chileuitt L., et al. (1991) Comparison of diffusion- and T2-weighted MRI for the early detection of cerebral ischemia and reperfusion in rats. *Magn Reson Med*, **18**, 39-50.

18) Warach, S., Gaa, J., Siewert, B., et al. (1995) Acute Human Stroke Studied by Whole Brain Echo Planar Diffusion-weighted Magnetic Resonance Imaging. *Ann Neurol*, **37**, 231-241.

19) 恵飛須 俊彦、田中 忠藏、梅田 雅宏、ほか。
(1997) 中枢神経系疾患における拡散強調画像。日獨医報, 42, 187-197.

20) Tsuruda, J.S., Chew, W.M., Moseley, M.E., et al. (1991) Diffusion-Weighted MR Imaging of Extraaxial Tumors. *Magn Reson Med*, **19**, 316-320.

21) Thomsen, C., Henriksen, O., Ring, P. (1987) In Vivo Measurement of Water Self Diffusion in the Human Brain by Magnetic Resonance Imaging. *Acta Radiol*, **28**, 353-361.

22) Moseley, M.E., Cohen, Y., Kucharczyk, J., et al. (1990) Diffusion-weighted MR Imaging of Anisotropic Water Diffusion in Cat Central Nervous System. *Radiology*, **176**, 439-446.

23) Moseley, M.E., Kucharczyk, J., Asgari, S., et al. (1990) Anisotropy in Diffusion-Weighted MRI. *Magn Reson Med*, **19**, 321-326.

- 24) Chenevert, T.L., Brunberg, J.A., Pipe, J.G. (1990) Anisotropic Diffusion in Human White Matter: Demonstration with MR Techniques in Vivo. *Radiology*, **177**, 401-405.
- 25) Chien, D., Buxton, R.B., Kwong, K.K., et al. (1990) MR Diffusion Imaging of the Human Brain. *J Comput Assist Tomogr*, **14**, 514-520.
- 26) Hajnal, J.V., Doran, M., Hall, A.S., et al. (1991) MR Imaging of Anisotropically Restricted Diffusion of Water in the Nervous System: Technical, Anatomic, and Pathologic Considerations. *J Comput Assist Tomogr*, **15**, 1-18.
- 27) Beaulieu, C., Allen, P.S. (1994) Determinants of Anisotropic Water Diffusion in Nerves. *Magn Reson Med*, **31**, 394-400.
- 28) 細谷貴亮, 安達真人, 白玉美, ほか. (1997) 頭部 MRI 最近の進歩. II diffusion image. 白質路の描出 (anisotropy). *臨画像*, **13**, 258-266.
- 29) 紀ノ定保臣, 小野元嗣, 奥田康之, ほか. (1993) MR Tractography — 拡散強調画像および最大値投影法を用いた神経路描出 — *日医放線会誌*, **53**, 171-179.

30) Douek, P., Turner, R., Pekar, J., et al. (1991) MR Color Mapping of Myelin Fiber Orientation. J Comput Assist Tomogr, **15**, 923-929.

31) Coremans, J., Luybaert, R., Verhelle, F., et al. (1994) A Method for Myelin Fiber Orientation Mapping Using Diffusion-weighted MR Images. Magn Reson Med, **12**, 443-454.

32) Nakada, T., Matsuzawa, H. (1995) Three-dimensional anisotropy contrast magnetic resonance imaging of the rat nervous system: MR axonography. Neurosci Res, **22**, 389-398.

33) 中田 力.(1995) 拡散テンソルと拡散強調画像: 画像数学. 日磁気共鳴医学会誌, **15**, 133-144.

34) 松沢 等, 斉藤 久寿, 阿部 弘, 中田 力. (1997) Diffusion Weighted Echo Planar Imaging を用いた Magnetic Resonance Axonography. 日本臨床, **55**, 1748-1751.

35) Pierpaoli, C., Jezzard, P., Basser, P.J., et al. (1996) Diffusion Tensor MR Imaging of the Human Brain. Radiology, **201**, 637-648.

- 36) Makris, N., Worth, A.J., Sorensen, A.G., et al. (1997) Morphometry of In Vivo Human White Matter Association Pathways with Diffusion-Weighted Magnetic Resonance Imaging. *Ann Neurol*, 42, 951-962.
- 37) Van Gelderen, P., De Vleeschouwer, M.H.M., DesPres, D., et al. (1994) Water Diffusion and Acute Stroke. *Magn Reson Med*, 31, 154-163.
- 38) Lythgoe, M.F., Busza, A.L., Calamante, F., et al. (1997) Effect of Diffusion Anisotropy on Lesion Delineation in a Rat Model of Cerebral Ischemia. *Magn Reson Med*, 38, 662-668.
- 39) Clemente, C.D., ed. (1985) *Gray's Anatomy*, thirtieth American ed., Lea & Febiger, Philadelphia, pp1097-1102.
- 40) Crosby, E.C., Humphrey, T.H., Lauer, E.W. (1962) *Correlative Anatomy of the Nervous System*, Macmillan Company, New York, pp394-409
- 41) Nieuwenhuys, R., Voogd, J., van Huijzen, C. (1988) *The Human Central Nervous System*, 3rd ed., Springer-Verlag, Berlin.
- 42) 萬年 甫、原 一之 (1994) 腦解剖学 南江堂 東京
- 43) Afifi, A.K., Bergman, R.A. (1998) *Functional Neuroanatomy*. McGraw-Hill, New York, p345.

- 44) Cumes, J.T., Burger, P.C., Djang, W.T., et al.
(1988) MR Imaging of Compact White Matter Pathways. AJNR, **9**, 1061-1068
- 45) Cowley, A.R. (1983) Influence of Fiber Tracts on the CT Appearance of Cerebral Edema: Anatomic-Pathologic Correlation. AJNR, **4**, 915-925.
- 46) Kitajima, M., Korogi, Y., Takahasi, M., et al.
(1996) MR Signal Intensity of the Optic Radiation. AJNR, **17**, 1379-1383.
- 47) Yagishita, A., Nakano, I., Oda, M., et al. (1994) Location of the corticospinal tract in the internal capsule at MR imaging. Radiology, **191**, 455-460.
- 48) 細矢貴亮, 山口昂一, 渡邊奈美, 渡邊順久, 高梨俊保.
(1993)内包後脚に進展した脳浮腫の MR imaging. 日医放線会誌, **53**, 775-780.

図

図 1. 正常ボランティアによる白質線維路のカラー表示画像(横断像)

a. 直交 3 方向に MPG を印加して得られた 3 枚の DWI の白黒を反転させ、画像の明暗に応じて、上下方向に MPG を印加した画像には赤、前後方向のものには青、左右方向には緑のカラースケールを与え、それを合成して一枚のカラー画像としたもの(処理 1)。上下方向に走る線維は赤く、前後方向の線維は青、左右方向は緑に見える。

b. 3 枚の DWI と $b=0$ の画像とから、3 枚の ADC 計算画像を作り、図 a と同様の RGB のカラースケールを与えたもの(処理 2)。0 から $3 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{sec}$ の範囲の ADC が 0 から 255 の明るさで表示されている。

c. 図 b と同じ画像であるが 0 から 255 の明るさの範囲に ADC の 0 から $2 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{sec}$ のウィンドウで表示しており、脳のコントラストが図 b よりも明瞭となっている。図 a に比べノイズの多い画像になっていることが判る。

d. ADC を計算して求めた白質線維路のカラー表示画像(図 b)を Trace 画像(図 e)で割って、均一な明度の画像とし色相情報のみの抽出を試みたもの(処理 4)。

e. 図 b を白黒表示した画像であるが、拡散テンソルの Trace 画像に対応する。

f. 図 a をスピンエコー法の T_2 強調画像に重ね合わせたもの(処理 5)。図 a の T_2 強調成分が補正され、図 b のコントラストに近い画像になっており、しかも、解剖学的構造がより明瞭である。白矢印は上後頭前頭束(前後に走る線維で青く見える)、白矢頭は放線冠(上下に走る線維で赤く見える)、黒矢印は上縦束(前後に走る線維で青く見える)、黒矢頭は帯状束(前下から後上に走る線維で紫に見える)を示している。正中部に、脳梁の緑色(左右に走る)を認める。

g. 図 f と同じもので、中小脳脚の高さの横断像である。白矢印は下小脳脚(赤)、白矢頭は中小脳脚(青紫)を示している。橋被蓋は全体に赤色となり下小脳脚を除き個々の線維構造を同定することは困難である。橋底部では皮質脊髓路の赤い色が左右に離れて認められる。

h. 図 f と同じもので、橋の頭側の高さの横断像である。白矢印は上小脳脚、白矢頭は鉤状束が側頭葉を下行する部分で赤色となっており、その上のスライスである図 i でも認められる。黒矢印は橋縦束を示している。横橋線維が緑色に描出されている。

i. 図 f と同じもので、大脳脚の高さの横断像である。黒矢印は上小脳脚交差(水色)、黒矢頭は下縦束ないし下後頭前頭束を示している。大脳脚付近で錐体路は斜めに走行するため、その色相は不明瞭である。

図 1

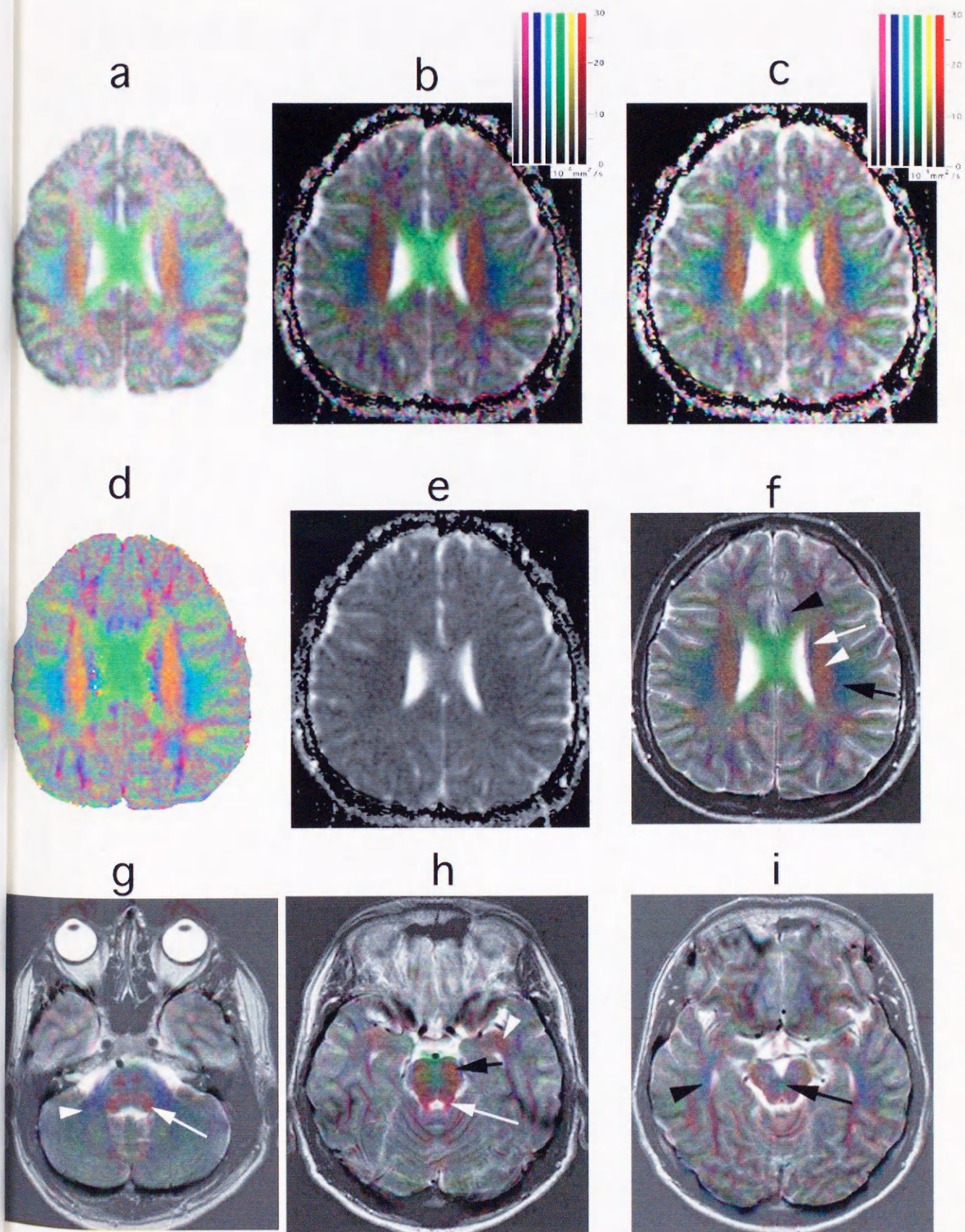


図 2. 正常ボランティアによる白質線維路のカラー表示画像(冠状断像、図 1, f と同じく処理 5 の画像)

- a. 前交連に近い位置。白矢印は帯状束(青紫)、白矢頭は上後頭前頭束(青紫)、黒矢印は鈎状束+下後頭前頭束を示す(赤紫+青紫)。脳梁と前交連付近が緑色で描出されている。
- b. 大脳脚から橋の前方のレベル。白矢印は上縦束、黒矢印はほぼ錐体路に対応している。白矢頭は中耳鼓室の空気によるアーチファクトである。黒矢頭は三叉神経で青紫色に見える。
- c. 橋被蓋付近のレベル。黒矢印は海馬采(青)、黒矢頭は脳弓(紫)、白矢印は下小脳脚、白矢頭は中小脳脚を示す。

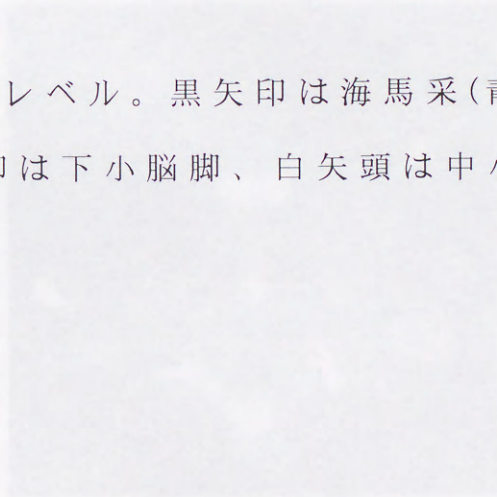
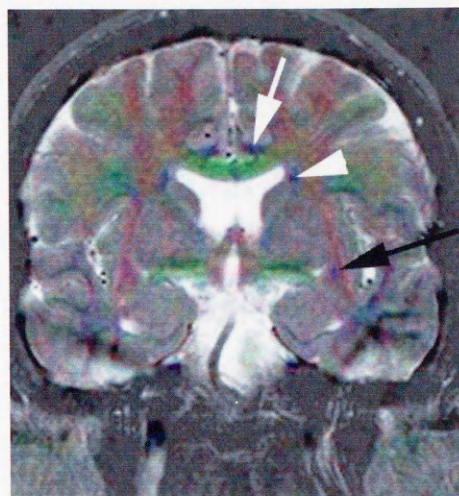
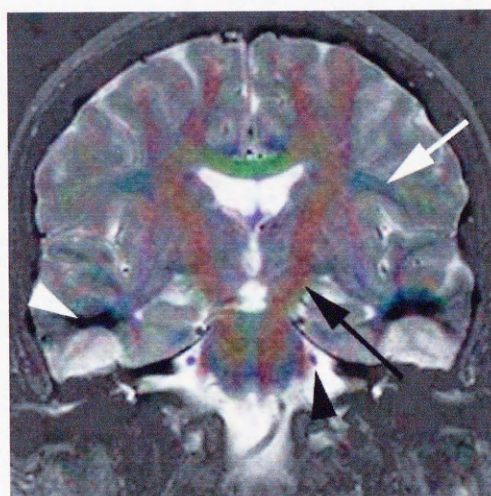


図2

a



b



c

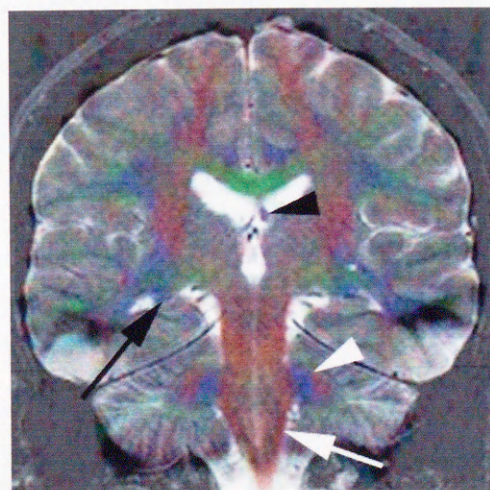


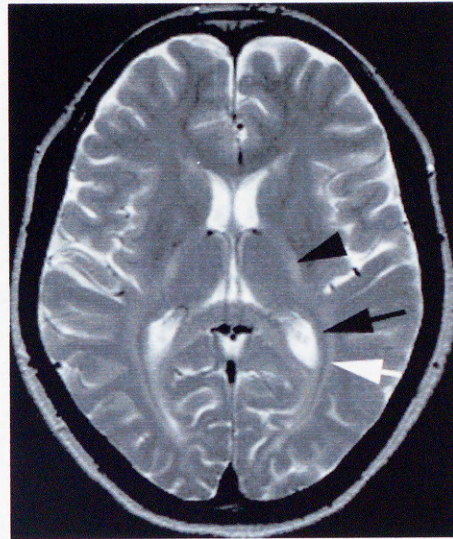
図 3. 内側及び外側矢状層が確認できた症例(41歳女)。

a. スピンエコー T_2 強調像。通常よりも外側矢状層と思われる構造(白矢印)や内包後脚(黒矢頭)の高信号が目立つ。黒矢印の低信号構造は内側矢状層+壁板と考えられる。

b. 図 a にカラー表示を重ね合わせた画像を一部拡大したもの(処理 5)。黒矢印で示すように、 T_2 強調像で低信号に見られる内側矢状層と思われる構造と、高信号の外側矢状層と考えられる構造にまたがる形で青色が描出されている。その内側に沿う形で壁板と考えられる構造が境界不明瞭ではあるが赤色で描出されている。壁板は脳梁から下行する形で側脳室外壁を走行しており、赤く見えるものと思われる。この図では、右側の側脳室外壁の方が色相がより明瞭に認められている。矢状層の外側には上縦束と連なるとされる連合線維がやはり赤色で描出されている。白矢頭で示される内包後脚が赤色で示されている。 T_2 強調像(a)の高信号部に一致していることが分かる。内包前脚は前後方向の線維が多いと思われ青く描出されている。また、黒矢頭で示される脳弓が赤紫色に描出されている。

図3

a



b

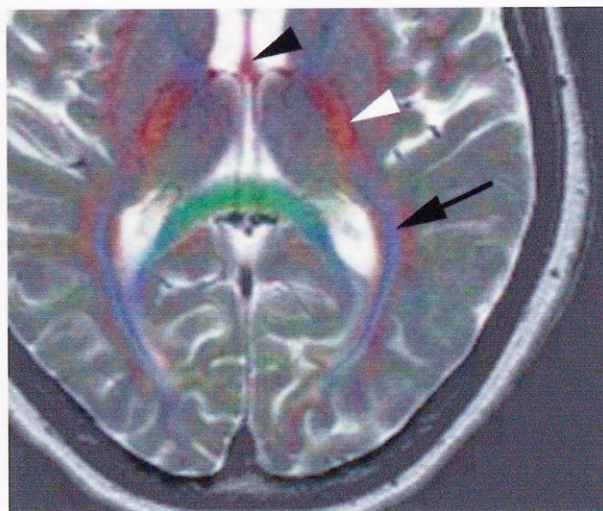


図 4. 脳腫瘍例。a、b、c、f は、麻痺の見られた症例。d、e、g は、麻痺の見られなかった症例。いずれの例でも、内包後脚が赤色ないしそれに少し黄色のまじった色相で認められる。全て処理 5 の画像を示してある。

a. 57 歳女性。右被殻の海綿状血管腫。右内包後脚(黒矢印)の前外側部は辺縁が不整となっている。

b. 70 歳男性。右側頭葉腫瘍(組織型不明)。右内包後脚(黒矢印)は腫瘍に取り囲まれ、細く見える。

c. 41 歳女性。視床の退形成性星細胞腫。左内包後脚(黒矢印)が細く見える。スピンエコーT₂強調像上、左内包後脚の同定は困難であった。

d. 57 歳男性。右側頭葉の退形成性星細胞腫。右内包後脚(黒矢印)は腫瘍に接して内側に圧排されているが、辺縁は整である。

e. 45 歳男性。左側頭葉の膠芽腫。赤色に見える左内包後脚(黒矢印)の周囲に高輝度の浮腫と思われる構造が見られ、それがさらに内包を櫛の歯状に横切っている。その外側には、淡蒼球の内節が、やはり浮腫に囲まれて認められるが、色相の違いから、内包との区別は容易である。

f. 49 歳女性。右前頭葉の膠芽腫。放線冠(黒矢印)が腫瘍により背側に圧排され、上縦束(黒矢頭)が背外側に圧排されていることが読みとれる。

g. 54歳女性。左蝶形骨稜部髄膜腫。左皮質脊髓路が腫瘍により内背側に圧排され、対側より赤みが強い。腫瘍の前部と後部は赤紫色に、左部と右部は緑色に描出され、腫瘍内に放射状の拡散異方性が存在していることが判る。



图4

